

UDK 624.024.15:624.016

Primljeno 6. 11. 2010.

Okvirna konstrukcija čelik – drvo s prečkom od hibridnog sustava

Miljenko Haiman, Krunoslav Pavković

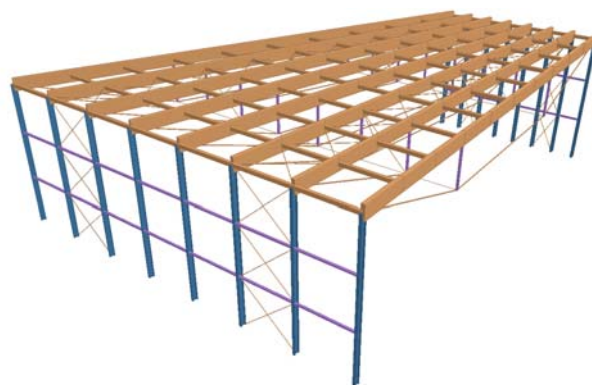
Ključne riječi okvirna konstrukcija, nadstrešna konstrukcija, čelična konstrukcija, prečka, hibridni sustav, lamelirano drvo	M. Haiman, K. Pavković Stručni rad Okvirna konstrukcija čelik- drvo s prečkom od hibridnog sustava Opisan je projekt nadstrešne konstrukcije koja je prvotno bila zamišljena kao čelična konstrukcija, a potom je izmijenjena. Izmjene se odnose na zamjenu prečke okvira hibridnim sustavom i uvođenje lameliranog drva u dio konstrukcije. Prikazani su detaljni proračuni i numerički modeli izvedeni programskim podrškama STAAD i COSMOSM. Izvedena konstrukcija prema numeričkim analizama prikazanim u ovom radu daleko je povoljnija, racionalnija i elegantnija, od prvotno projektirane.
Key words frame structure, shed structure, steel structure, cross beam, hybrid system, laminated wood	M. Haiman, K. Pavković Professional paper Steel-wood frame structure with a hybrid cross-beam system Design of a shed structure, initially conceived as a steel structure, and subsequently modified, is described. The modifications concern replacement of the frame cross beam by a hybrid system, and introduction of laminated wood into a part of the structure. Detailed analyses and numerical models derived by means of the STAAD and COSMOSM software are presented. The structure derived according to numerical analyses presented in this paper is much more favourable, rational and elegant, when compared with the initially designed structure.
Mots clés construction cadre, construction d'auvent, construction en acier, poutre transversale, système hybride, bois contreplaqué	M. Haiman, K. Pavković Ouvrage professionnel Construction cadre acier-bois à système hybride de poutre transversale Un projet d'auvent, conçu au début comme une construction en acier, et modifié par la suite, est décrit. La modification concerne notamment le remplacement de la poutre transversale par un système hybride, et l'introduction du bois contreplaqué dans une partie de la construction. Les analyses détaillées et les modèles numériques dérivés par les logiciels STAAD et COSMOSM sont présentées. La construction dérivée selon les analyses numériques présentées dans l'ouvrage est beaucoup plus favorable, rationnelle et élégante, si l'on la compare avec le projet d'auvent initial.
Ключевые слова рамная конструкция, навесная конструкция, стальная конструкция, ригель, гибридная система, ламельированное дерево	M. Хаиман, К. Павлович Отраслевая работа Рамная конструкция сталь-дерево с ригелем из гибридной системы Описан проект навесной конструкции, которая первоначально была задумана как стальная, но в дальнейшем изменена. Изменения относились к замене ригеля рамы гибридной системой и введению ламелированного дерева в часть конструкции. Приведены подробные расчеты и цифровые модели, выполненные с применением программ STAAD и COSMOSM. В соответствии с цифровыми анализами, приведенными в данной работе, выполненная конструкция является гораздо более выгодной, рациональной и элегантной по сравнению с первоначально спроектированной.
Schlüsselworte Rahmenkonstruktion, Schuttdachkonstruktion, Stahlkonstruktion, Querstück, Hybridsystem, Schichtholz	M. Haiman, K. Pavković Fachbericht Rahmenkonstruktion Stahl - Holz mit Querstück aus Hybridsystem Beschrieben ist der Entwurf einer Schuttdachkonstruktion die vorerst als Stahlkonstruktion gedacht war, aber später abgeändert wurde. Die Änderungen beziehen sich auf den Austausch des Querstücks durch ein Hybridsystem und Einführung von Schichtholz in einen Teil der Konstruktion. Dargestellt sind detaillierte Berechnungen und numerische Modelle ausgeführt durch Programmunterstützung STAAD und COSMOSM. Die Konstruktion ausgeführt nach den im Artikel dargestellten numerischen Analysen ist weit günstiger, rationaler und eleganter als die vorerst entworfene.

Autori: Doc. dr. sc. **Miljenko Haiman**, dipl. ing. građ., Arhitektonski fakultet Sveučilišta u Zagrebu;
Krunoslav Pavković, dipl. ing. građ., Tehničko veleučilište, Graditeljski odjel, Zagreb

1 Uvod

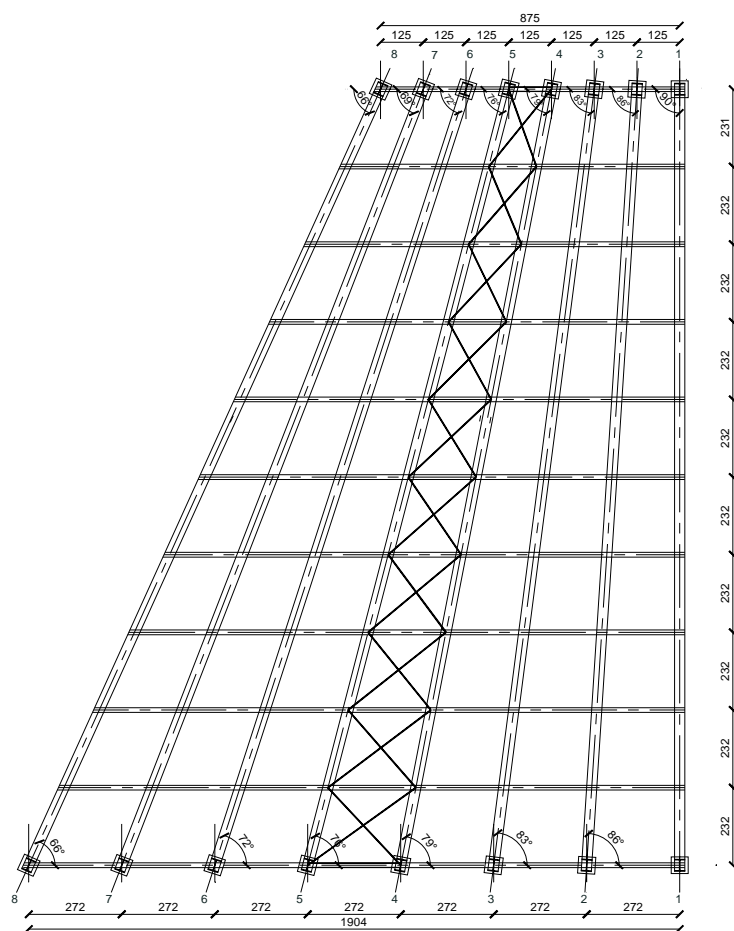
Na lokaciji u Lučkom bilo je potrebno predložiti konstrukciju nadstrešnice koja bi natkrivala prostor za istovar kamiona. Projekt konstrukcije koji je investitor posjedovao (slika 1.), predviđao je čeličnu konstrukciju sastavljenu od 8 dvozglonih okvira raspona od 23,50 do 25,50 m sa stupovima visine 7,00 metara. Okviri su tlocrtno lepezasto položeni pod kutom $3,36^\circ$, što daje njihov međusobni razmak na jednoj strani 1,25 m, a na drugoj, udaljenijoj 2,75 m. Elementi okvira trebali su biti od profila HEB 360. U krovnoj su ravnini sekundarni nosači bili predviđeni na međusobnom razmaku od oko 2,33 m te su bili projektirani od profila IPN 140. Horizontalna i vertikalna stabilizacija konstrukcije bila je provedena vlačnom stabilizacijom s dijagonalama promjera $\Phi 28$ mm između 4. i 5. okvira. Ova je konstrukcija trebala imati vlastitu težinu približno 49,9 tona, odnosno 155 kg/m^2 .

Nakon analize prvog prijedloga predložena je nova konstrukcija koja je prikazana na slici 2. Odabran je isti statički sustav, s time da je čelična prečka okvira zamijenjena dr-



Slika 2. Aksonometrijski prikaz modela prema novom rješenju

venom gredom s vanjskim prednapinjanjem (hibridni sustav). Projektiranje ove konstrukcije izvedeno je u dvije faze. U prvom je fazi modeliran štapni numerički model programskom podrškom STAAD.Pro. Druga se faza sastojala od izrade detaljnijega numeričkog modela programskom podrškom COSMOSM. Ovaj je model bio namijenjen za potvrdu dobivenih rezultata i razjašnjavanje nepoznanica koja su se pojavile kod prvog modela.



Slika 1. Tlocrt i presjek iz prvoprojektiranog rješenja

2 Opterećenja na konstrukciju

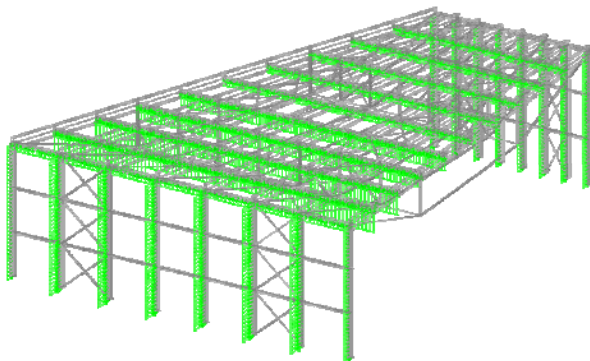
Opterećenje je odabrano prema normama EC1 za stalno opterećenje te vjetar i snijeg. Potresno je opterećenje izostavljeno s obzirom na malu masu konstrukcije.

Vlastita težina elemenata konstrukcije uzeta je u obzir kao gravitacijsko djelovanje (*selfweight*). Težina pokrova i instalacija zajedno je $0,15 \text{ kN/m}^2$.

Budući da se konstrukcija nalazi na području Zagreba, djelovanje snijega uzeto je prema EC1 za prvu sniježnu zonu. Uz karakteristično opterećenje snijegom od $1,55 \text{ kN/m}^2$, usvojeni su temperaturni koeficijent i koeficijent izloženosti u vrijednosti od 1,0. Nepovoljniji uvjeti djelovanja vjetra koji bi utjecali na raspodjelu snijega na krovu nisu uzeti u obzir, a građevina je negrijana i na zabatnim stranama otvorena što opravdava odabrane koeficijente. Koeficijent oblika krova usvojen je prema propisima za jednostrešne krovove i nagibe do 30° u vrijednosti od 0,8.

$$s = s_k \cdot \mu \cdot C_e \cdot C_t = 1,55 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 1,24 \text{ kN/m}^2$$

Opterećenje vjetrom uzeto je iz dva smjera - uzdužno i poprečno na građevinu (slika 3.). Usvojena referentna brzina vjetra prema EC1 za vjetrenu zonu I. je $22,0 \text{ m/s}$. Koeficijent izloženosti za kategoriju terena III (predgrađa, gradovi, industrijske zone) i prosječnu visinu građevine $7,0 \text{ m}$ usvojen je 1,65.



Slika 3. Shema opterećenja vjetrom poprečno na konstrukciju

Valja napomenuti da je usvojena pretpostavka da se zabatne stijene u budućnosti djelomično zatvore, stoga je uzet i tlak vjetra, na (u I. fazi izgradnje) nepostojeće stijene.

S obzirom da je konstrukcija okvirna, u skladu sa normom EC3, dobiveno je ekvivalentno zamjensko horizontalno opterećenje.

$$\Delta H_{d1} = \phi \cdot V_d = \frac{1}{200} \cdot 113,03 = 0,565 \text{ kN}$$

$$\phi = k_c \cdot k_s \cdot \phi_o = 1,0 \cdot 1,0 \cdot \frac{1}{200} = 1/200$$

$$\phi_o = 1/200; \quad n_c = 2; \quad n_s = 1$$

$$k_c = \sqrt{0,5 + 1/n_c} = 1,0$$

$$k_s = \sqrt{0,2 + 1/n_s} = 1,0$$

$$V_d = L \cdot (1,35 \cdot g + 1,5 \cdot q)$$

$$V_d = 25,8 \cdot (1,35 \cdot 0,65 + 1,5 \cdot 2,33)$$

$$V_d = 113,06 \text{ kN}$$

gdje su:

Φ - kut rotacije okvira

$$\Phi_o = 1/200$$

n_c - broj stupova

n_s - broj katova

V_d - proračunska uzdužna sila u stupovima

Spomenuto opterećenje dobiveno ovisno o imperfekciji okvira rabimo za klasifikaciju pomičan - nepomičan okvir te za određivanje koji tip proračuna upotrijebiti. Kako su ovi sustavi relativno male krutosti te deformacije drugog reda imaju velike utjecaje na naprezanja u elementima, primjenjuje se proračun drugog reda.

Vertikalna uzdužna stabilizacija dodatno je opterećena zamjenskom horizontalnom silom zbog imperfekcije.

$$\Delta H_{d2} = \phi \cdot V_d = 1/253 \cdot 452,24 = 1,786 \text{ kN}$$

Ekvivalentno opterećenje zbog imperfekcije prečaka okvira na horizontalni poprečni vez iznosi:

$$\sum q = \frac{\varsigma}{63,8} \cdot \frac{\sum N_{Ed}}{L} = \frac{9/8}{63,8} \cdot \frac{1091,4}{25,8} = 0,746 \text{ kN/m}$$

$\varsigma = 1,0$ stabilizacija u deset polja

$$\sum N_{Ed} = 1091,4 \text{ kN iz proračuna}$$

3 Numerički modeli

3.1 Numerički model Staad Pro. 2007

Prvi korak u projektiranju ove konstrukcije napravljen je izvedbom štapnoga numeričkog modela programskom podrškom STAAD.Pro. Ovim modelom obuhvaćena je glavnina problema kao što je otpornost poprečnog presjeka i elemenata. Svrha modela bila je određivanje i dimenzioniranje svih čeličnih elemenata prema normama EC3. Također, provedeno je dimenzioniranje drvenoga grednog elementa prema normama EC5.

Numerički model u STAAD-u izveden je tako da su svi elementi zadani kao elementi BEAM sa izuzetkom na dijagonale stabilizacije koja je zadana s vlačnim elementima.

Prethodno je spomenuto da se konstrukcija može promatrati kao nepridržana okvirna konstrukcija. Spoj između stupa i grednoga hibridnog sustava modeliran je upeto, dok je spoj stupa na temelj zamišljen kao zglobova veza.

Prečka okvira (hibridni sustav) sastoji se od zatege, drvene lamelirane grede te dvaju vertikalnih čeličnih tlačnih elemenata koji su postavljeni približno u trećinama raspona.

Okviri su u krovnoj ravni međusobno povezani sa sekundarnim drvenim nosačima, na međusobnom razmaku od oko 2,33 m. Sekundarni elementi u izvedbi povezani su s grednim elementima čeličnim vezama koje ne omogućavaju prijenos momenta, pa je stoga ova veza modelirana zglobovno. Stupovi okvira međusobno su povezani u trećinama visine čime je bitno smanjena njihova duljina izvijanja izvan ravnine okvira. Veza spomenutih horizontalnih elemenata i stupova također je modelirana zglobovno.

Stabilizacija konstrukcije, uključujući horizontalnu i vertikalnu stabilizaciju, izvedena je prema iskustvenom pravilu za drvene konstrukcije u drugom polju od vanjskih okvira.

Stabilizacija donjih slobodnih točaka tlačnih elemenata izvedena je izvan krovne ravnine postavljanjem vlačne stabilizacije u poljima prethodno spomenutih spregova. Ostali slobodni krajevi tlačnih štapova povezani su tlačno-vlačnim čeličnim elementima.

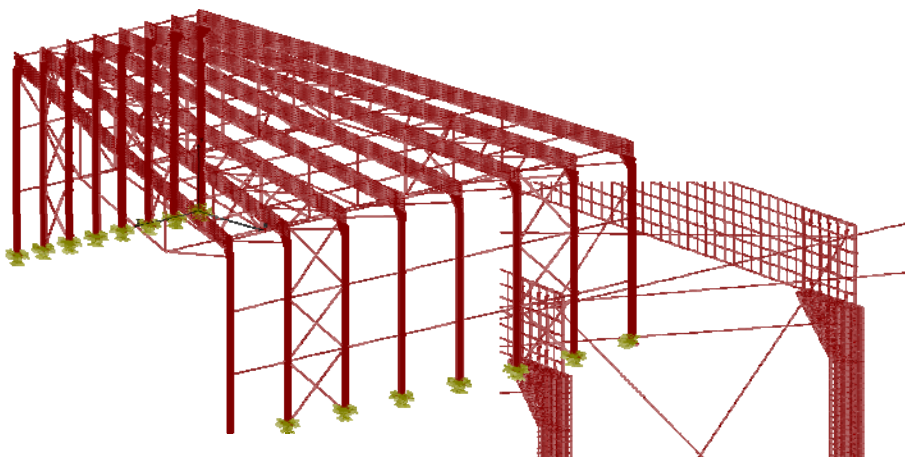
Opterećenja su zadana u iznosima i redosljedu opisanim u drugom dijelu ovoga rada kao linijsko opterećenje na sekundarne nosače i stupove. Kombinacije su zadane prema normi EC0 te su poslužile za dimenzioniranje konstrukcije.

3.2 Numerički model COSMOSM 2008

Detaljniji numerički model proveden je programskom podrškom COSMOSM. Model ima 92 907 plošnih i štapnih elemenata (slika 4.). Za modeliranje drvenih grednih nosača upotrijebljeni su elementi SHELL4L jer oni omogućavaju zadavanje ortotropnih karakteristika materijala. Čelični stupovi koji su u STAAD-u odabrani kao IPE 240 ovdje su modelirani istih dimenzija, ali od plošnih elemenata SHELL4. Modeliranje stupova pro-

vedeno je u potpunosti s plošnim elementima, uključujući spoj, stup, temelj i upeti priključak prečka-stup.

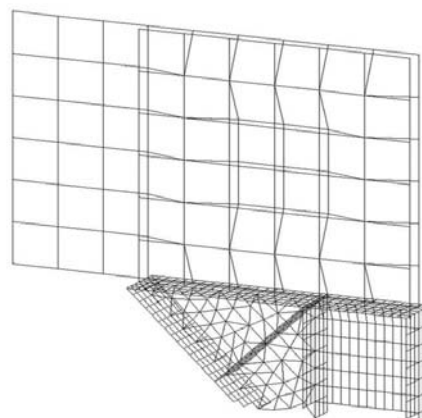
Modeliranje sekundarnih krovnih nosača provedeno je elementima BEAM3D, s time da je na krajevima spriječen prijenos momenta oko y i z osi. Istim elementima modelirane su čelične horizontalne cijevi u uzdužnim stijenama, kao i tlačne vertikale koje spajaju zategu i gredni nosač.



Slika 4. Prikaz numeričkog modela – program COSMOSM

Modeliranje zatega koje podupiru gredni drveni nosač te s njime tvore hibridni sustav provedeno je s konačnim elementima TRUSS3D, kao i sva stabilizacija.

Kutni spoj između stupa i grede modeliran je tako da je osiguran različit raster mreža konačnih elemenata dvaju materijala (slika 5.). Za preuzimanje momenta upetosti naknadno je spojeno šesnaest određenih čvorova kao simulacija ugrađenih trnova ili vijaka.

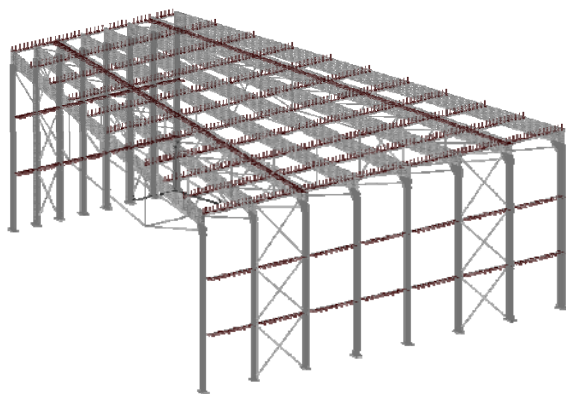


Slika 5. Kutni spoj

Modeliranje temeljnih ploča provedeno je elementima SHELL4 kao nastavak na stup. Sidreni vijci i oslonci osigurani su tako što su simetrično u 6 čvorova temeljne ploče spriječeni pomaci.

Izvedeni se model upotrijebio za linearni proračun kojim se željelo dobiti pravu raspodjelu naprezanja unutar konstrukcije te za proračun stabilnosti. Za linearni proračun zadavani su slučajevi opterećenja te su od njih dobivene kombinacije opterećenja. U COSMOSM-u kombinacije opterećenja su bez parcijalnih koeficijenata sigurnosti jer je cilj bio provjera nosivosti stvarnih stanja naprezanja. Opterećenje za proračun stabilnosti zadano je kao zbroj opterećenja koja su se u kombinacijama pokazala kao najnepovoljnija. Kako za sve nelinearne proračune tako i za proračun stabilnosti moguće je računati samo s jednim slučajem opterećenja pa je iz tog razloga primijenjen spomenuti postupak.

Mjerodavno vertikalno opterećenje zadano je koncentriranim silama u čvorovima sekundarnih drvenih nosača (slika 6.).



Slika 6. Opterećenje za analizu stabilnosti na izbočivanje

4 Analiza rezultata

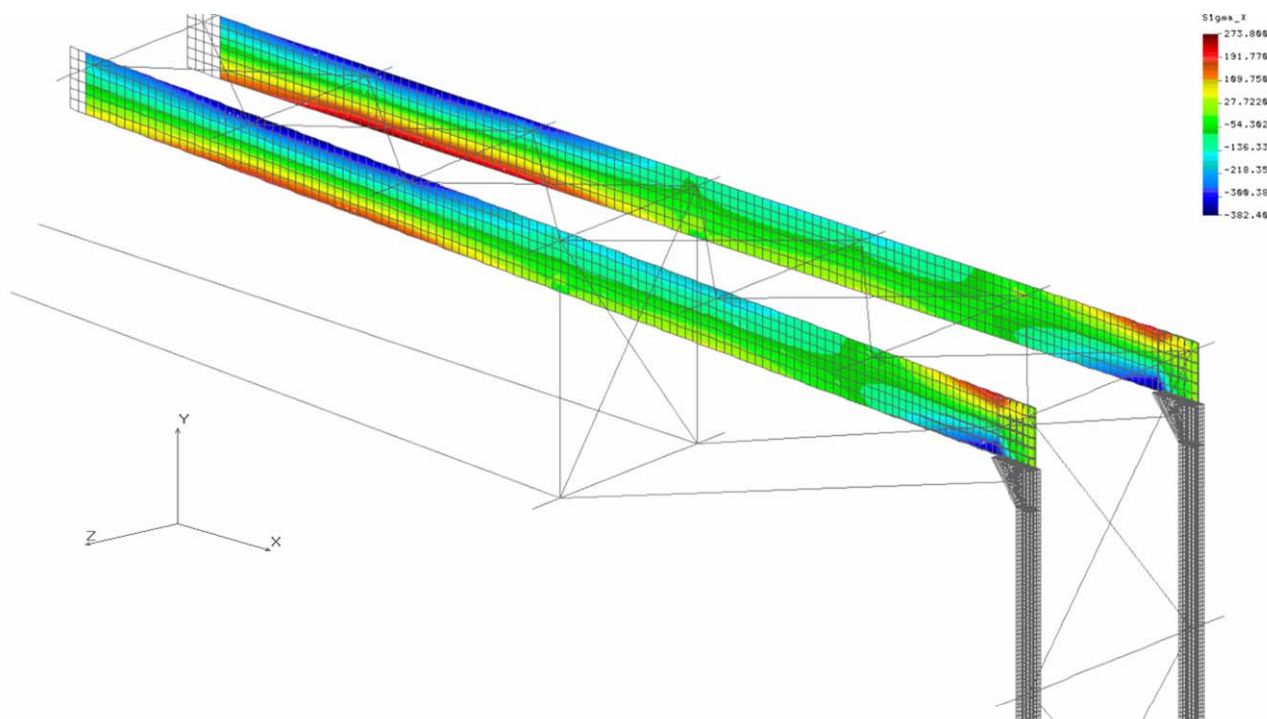
U numeričkom modelu usvojeni su elementi koji svojom otpornošću i stabilnošću zadovoljavaju zadana opterećenja. Tako su za stupove usvojeni profili IPE 240.

Horizontalni elementi u uzdužnim stijenama postavljeni u trećinama visine stupova odabrani su od cijevnih profila $60 \times 60 \times 4,0$. Tlačni vertikalni elementi koji spajaju zategu s gredom unutar hibridnog sustava okruglog su cijevnog profila $\Phi 101,6 \times 4,0$.

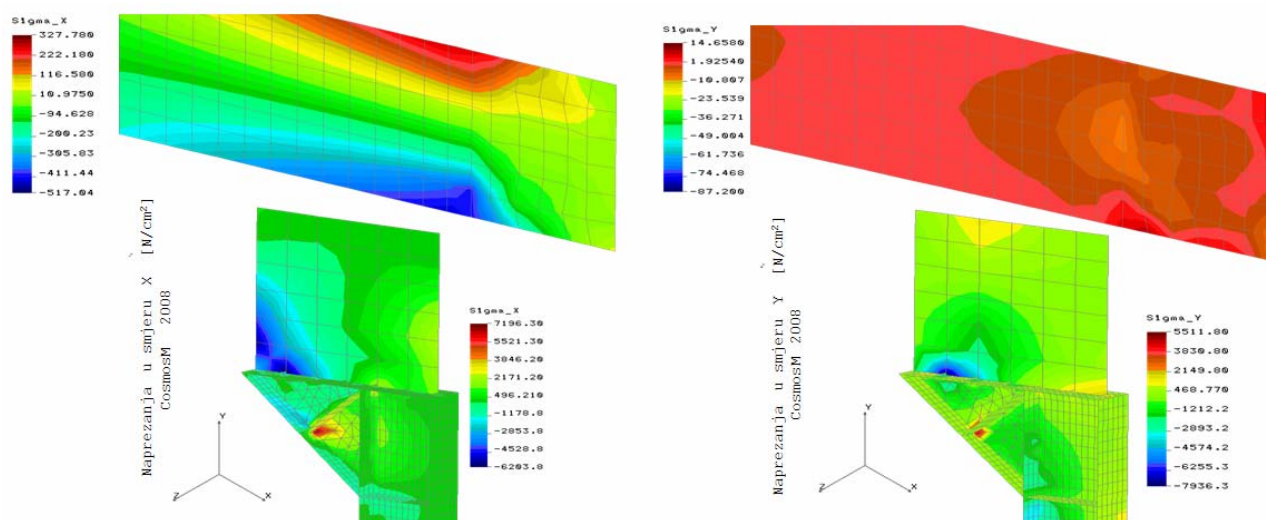
Stabilizacija konstrukcije odabrana je prema katalogu proizvođača Besista $\Phi 16$ mm za svu stabilizaciju izuzev stabilizacije donjeg pojasa koja je $\Phi 14$ mm. Karakteristike stabilizacija usvojene su prema rezultirajućim silama u numeričkom modelu.

Zatega hibridnog sustava odabrana je $\Phi 36$ mm, uz napomenu da se vertikalni pomaci od stalnog opterećenja poništavaju prednapinjanjem. Spomenuto prednapinjanje ostvareno je pri montaži veličinom sile od 28,0 kN, što djelomično poništava deformiranje. Oko 30 % progiba od stalnog opterećenja ostavljeno je kao rezerva za sprječavanje mogućeg savijanja nosača prema gore zbog odižućeg djelovanja vjetrova.

Preliminarnim proračunom programskom podrškom STAAD, za drvo su usvojene dimenzije grednoga drvenog elementa 14×60 cm.



Slika 7. Prikaz naprezanja u smjeru x grednoga drvenog nosača



Slika 8. Detaljni prikaz rezultata naprezanja σ_x , σ_y u drvu i čeliku u zoni kutnog spoja

Osim dimenzioniranja prema eurokodovima proračunane su i vrijednosti momenata, uzdužnih i poprečnih sila, koji podaci su poslužili pri proračunu detalja ove konstrukcije. Numeričkim modelom COSMOSM dobivena su naprezanja u drvenom nosaču kao što je prikazano na slici 7. Proračun graničnog stanja nosivosti poduprte grede od homogenoga i lijepljenog lameliranoga drveta razreda čvrstoće II. (GL24h) zadovoljava. Ovime su potvrđene dobivene vrijednosti iskoristivosti drvenih elemenata dimenzioniranih prema eurokodovima programom STAAD. Detaljnije stanje naprezanja u drvenim i čeličnim elementima u zoni kutnog spoja prikazano je na slici 8.

Dobiveni faktor elastičnoga kritičnog opterećenja čitavog sustava u proračunu izvijanja iznosi 9,83, što daleko nadilazi potreban koeficijent sigurnosti takvih nosača koji iznosi oko 3,0. Prvi se oblik otkazivanja događa gubitkom stabilnosti točke u kojoj se spajaju tlačni vertikalni element i zatega. Slijedi da s obzirom na iskoristivost drvenoga grednog elementa dobivena naprezanja i faktor izvijanja imamo dovoljnu sigurnost ove konstrukcije.

Proračun pomaka konstrukcije pokazuje da su njihove vrijednosti unutar dopuštenih granica. Vertikalni pomak grednoga hibridnog sustava dobiven proračunom iznosi 3,8 cm bez prednapinjanja i 1,8 cm s prednapinjanjem zatege, što je mnogo manje od dopuštenih 10,0 cm. Također, uzdužni pomak konstrukcije dobiven u oba modela manji je od dopuštenog i iznosi oko 0,7 cm, što je također manje od 1,4 cm koliko je dopušteno prema GSU-u.

LITERATURA

- [1] Eurocode 0. *Basis of structural design*, CEN European Committee for Standardization. Brussels: EN 1990: 2002.

5 Zaključak

Cilj je bio projektirati racionalniju i jeftiniju konstrukciju u odnosu prema predloženom prvom rješenju. Ispravnim izborom koncepcije konstrukcije i uvođenjem novog materijala, uz primjenu programske podrške STAAD-a i COSMOSM-a, postignut je cilj.



Slika 9. Prikaz izvedene konstrukcije

Usporedbe radi, ukupna težina čelika prvoprojektirane konstrukcije bila je 49,9 t, a racionalnijim rješenjem ova težina smanjena je na 7,08 t. Utrošak čelika po tlocrtnoj ploštini natkrivenog prostora koji iznosi 322,0 m² u prvom je rješenju bio 155,0 kg/m² te je smanjen na 22,0 kg/m². Novim rješenjem utrošeno je 21,5 m³ lameliranog drveta kao novog materijala. Izraženo po tlocrtnoj ploštini natkrivenog prostora utrošeno je 0,067 m³/m².

Izvedena konstrukcija oblikovno je elegantnija od prvoprojektirane i gotovo dvostruko jeftinija (slika 9.).

- [2] Eurocode 1-Basis of design and actions on structures, Part 1-1. *General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings*, CEN European Committee for Standardization. Brussels: EN 1991-1-1: 2002.

- [3] Eurocode 1-Basis of design and actions on structures, Part 1-3. *Snow loads*, CEN European Committee for Standardization. Brussels : EN 1991-1-3: 2003.
- [4] Eurocode 1-Basis of design and actions on structures, Part 1-4. *Wind loads*, CEN European Committee for Standardization. Brussels : EN 1991-1-4: 2005.
- [5] Eurocode 3-Design of steel structures. *Part 1-8: Design of Joints*, CEN European Committee for Standardization. Brussel: EN 1993-1-8: 2005.
- [6] Eurocode 3-Design of steel structures. *Part 1-1: General rules and fules for buildings* , CEN European Committee for Standardization. Brussels: EN 1993-1-1: 2006.
- [7] Eurocode 5-Design of timber structures. *Part 1-1: General rules and rules for buildings* , CEN European Committee for Standardization. Brussels: EN 1995-1-1: 2004.
- [8] Gotz, K. H., i dr.: *Timber Design and Construction Sourcebook*. USA: McGraw-Hill.Inc, 1989.
- [9] Žagar, Z.: *Drvene konstrukcije 1., Drvene konstrukcije 2.*, Zagreb: Pretei d.o.o., 2004.
- [10] Bentley. *Staad.Pro 2007 Manual*. 2007.
- [11] SolidWorks. *COSMOS/M v.2.95 Basic Modules*. 2008.
- [12] <http://www.besista.eu>. [mrežno] 7. svibanj 2009.